



Departamento de Teoría de la Señal y Comunicación

PROYECTO FIN DE GRADO

Simulación en Matlab de la desincronización de la señal LTE en
el enlace descendente

Autora: Ainhoa Sainz-Ezquerria Benito

Tutor: Dr. Víctor P. Gil Jiménez

Leganés, Septiembre 2014

INDICE

INDICE ACRONIMOS	4
RESUMEN.....	6
ABSTRACT	7
SUMMARY	8
1. INTRODUCCIÓN	18
1.1 Motivación	18
1.2 Objetivo.....	19
1.3 Estructura de la memoria.....	19
2. CARACTERISTICAS DEL SISTEMA.....	20
3. ESTADO DEL ARTE.....	21
3.1 Evolución de las tecnologías e inhibidores	21
3.2 Marco regulador	22
4. ARQUITECTURA DEL SISTEMA LTE.....	23
4.1 Introducción	23
4.2 Arquitectura general de los sistemas celulares.....	23
4.3 Arquitectura general del sistema LTE.....	24
4.4 Red troncal de paquetes evolucionada: EPC.....	25
4.5 Red de Acceso evolucionada: E-UTRAN	26
4.6 Equipos de usuario	27
5. TECNOLOGIAS DE NIVEL FISICO	28
5.1 Fundamentos de OFDM.....	29
5.2 OFDMA como técnica de acceso múltiple para el enlace descendente	30
6. CONCEPTO DE BLOQUE DE RECURSOS FISICOS	32
6.1 Estructura de Trama	35
7. ENLACE DESCENDENTE	35
7.1 Señales Físicas en el enlace descendente	36
7.1.1 Señales de Referencia (RS).....	36
7.1.2 Señal de Sincronización (SCH)	37
7.2 Canales Físicos en el enlace descendente.....	38

8.	PROCEDIMIENTOS BÁSICOS ASOCIADOS A LA INTERFAZ AIRE.....	40
8.1	Procedimiento de sincronización y adquisición inicial de parámetros.....	40
8.2	Procedimiento de acceso aleatorio	42
8.2.1	Acceso basado en contienda	42
8.2.2	Acceso regulado	43
9.	DESARROLLO DEL TRABAJO.....	43
9.1	Fase 1: Búsqueda y análisis de toda la información bibliográfica sobre LTE.	43
9.2	Fase 2: Búsqueda y análisis de una simulación completa del sistema LTE en el canal descendente a nivel físico.....	44
	La última simulación que se realiza es con la configuración de canal de AWGN, la señal se desincroniza a los 7 dB como se puede observar en la tabla 9.5.....	46
9.3	Fase 3: Planificar los aspectos del diseño que se van a incluir en el simulador, para realizar la desincronización.	46
9.4	Fase 4: Desarrollo del sistema diseñado y realizar diferentes simulaciones para analizar los resultados.	47
10.	CONCLUSIÓN	49
10.1	Propuesta.....	49
10.2	Marco socio-económico	49
	BIBLIOGRAFÍA.....	51

INDICE ACRONIMOS

3GPP- 3rd Generation Partnership Project

BSC- Base Station Controller

BTS- Base Transceiver Station

CDMA- Code Division Multiple Access

CDMA2000- 3GPP2 (3rd Generation Partnership Project 2)

CW- Continuous Wave

DFT- discrete Fourier transform

EPC- Evolved Packet Core

EDGE- Enhanced Data Rates for GSM Evolution

E-UTRAN- Evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network

FDD- Frequency-division duplexing

FDMA- Frequency Division Multiple Access

GPRS- General Packet Radio Service

GSM- Global System for Mobile Communications

HARQ- Hybrid Automatic Request

HSPA- High-Speed Packet Access

HSS - Home Subscriber Server

IDFT- inverse DFT

IP- Internet Protocol

ITU-International Telecommunication Union

LTE- Long Term Evolution

ME - Mobile Equipment

MIMO- Multiple-input Multiple-output

MME - Mobility Management Entity

OCS- Online Charging System

OFCS- Offline Charging System

OFDM- Orthogonal Frequency Division Multiplexing

OFDMA- Orthogonal Frequency Division Multiple Access

PAPR- Peak-to-Average Power Ratio

PCRF -Policy and Charging Rules Function

P-GW- PDN Gateway

PRACH- Preámbulo Acceso Aleatorio

PRB - Physical Resource Block

P-SCH-Primary Synchronization Channel

RNC- Radio Network Controller

SAE- System Architecture Evolution

SGSN - serving GPRS Support Node

S-GW - Serving Gateway

SIM- Subscriber Identity Module

S-SCH (Secondary Synchronization Channel

TDD- time-division duplexing

TDMA- Time division multiple access

TS- Time Slot

UMTS- Universal Mobile Telecommunication System

UTRAN- UMTS Terrestrial Radio Access Network

W-CDMA-Wideband Code Division Multiple Access

RESUMEN

Este proyecto estudia la tecnología de cuarta generación LTE con el objetivo de proponer un diseño de desincronización de la señal LTE en el enlace descendente en una simulación MATLAB. Por ello, se presenta un estudio y análisis de toda la tecnología LTE.

En primer lugar, se realiza una búsqueda de toda la información bibliográfica sobre LTE y su posterior análisis. Dicha información se agrupa por términos para una fácil comprensión de ésta. Se abarca los términos principales que componen la tecnología, así como las diferencias que tiene esta con otras tecnologías. Se estudian las características de LTE, la arquitectura del sistema, las técnicas de acceso múltiple que se utilizan en el enlace descendente, los procedimientos básicos asociados a la interfaz aire y sobre todo se estudia el enlace descendente y sus canales.

A continuación, se realiza una búsqueda de una simulación completa en MATLAB en el enlace descendente a nivel físico. Debido a que esta simulación va a servir de base para realizar el diseño, se tiene que hacer un análisis completo del sistema y entender el funcionamiento de este.

Posteriormente, se planifica los aspectos del diseño que se van a incluir en el simulador. Primero se establece la configuración con la que se va a trabajar y después se realizan unas comprobaciones. Es necesario realizar estas comprobaciones para asegurarnos de que trabajamos en la zona adecuada.

Finalmente, se desarrolla el sistema diseñado en la simulación y se realiza diferentes simulaciones para analizar los resultados y comprobar que la señal se ha desincronizado correctamente.

ABSTRACT

This project studies the fourth generation LTE technology with the aim to propose a design of unsynchronization in the LTE downlink signal in a MATLAB simulation. Therefore, a study and analysis of all the LTE technology is presented.

First, a search of all bibliographic information about LTE and its subsequent analysis is obtained. Such information is divided into terms for easy understanding. The main features that make the technology and the differences are reviewed, such as, LTE characteristics, system architecture, multiple access techniques used in the downlink, the basic procedure related to the air interface and all the downlink channels.

Then, a search for a full simulation at the physical level in MATLAB in downlink is performed.

Subsequently, the aspects of the design that is included in the simulator are planned. First the configuration that is going to be used is selected and then several checks and tests are performed. These checks are required to ensure that works in the proper scenario.

Finally, the simulation system designed is implemented and analyzed to ensure that the signal is not properly synchronized.

SUMMARY

Introduction

The evolution of wireless phone technology can be grouped into various generations based on the levels of technology.

The 1G or First Generation was represented by an analog wireless access system for voice traffic. The analog channel was susceptible to static noise and did not provide any protection from eavesdropping on the shared media. However, this technology was the foundation to the "cellular" technology which pioneered the use of small hexagonal service areas and hence supported frequency re-use across the "cells" without interference.

The 2G or Second Generation technologies which represented replacement of the analog radio network into the digital radio network. The digital technology was much superior than its analog counterpart in the sense that digitized data could be subjected to superior processing techniques making it less susceptible to noise. Furthermore, 2G technologies could be further classified into Time Division Multiple Access (TDMA) based and Code Division Multiple Access (CDMA) based. The TDMA based technology was adopted mostly in Europe and was called GSM.

Between 2G and 3G have an interim generation of 2.5G which implemented a packet switched domain in addition to the circuit switched domain, was called General Packet Radio Service (GPRS) the evolution of GSM. GPRS provided a packet switched service over GSM offering data speeds between 56-114 kbps.

The evolution of Second Generation was the Third Generation of Mobile technology, better known as 3G. The ITU under the International Mobile Telecommunications Program fixed the minimum data rate of 144kbps for any technology to qualify to be a 3G technology. However, most technologies which fall under this category by far surpass this minimum limit and provide data rates typically between 5-10 Mbps. 3G Technologies achieve better spectral efficiency over wide area cellular telephone networks allowing for higher data rates and enhanced services. In Europe the 3G technology adopted is the UMTS, using W-CDMA as the air interface. UMTS based 3G technologies have raised themselves to 3.5G with HSDPA (High Speed Downlink Packet Access) allowing data rates up to 7.2Mbps.

At last, the Fourth Generation was called LTE is a standard for wireless communication of high-speed data for mobile phones and data terminals, increasing the capacity and speed, using a different radio interface together with core network improvements. The standard is developed by the 3GPP and is specified in its Release 8 document series, with minor enhancements described in Release 9.

The figure presents a pictorial depiction of the discussion so far. Also, the figure describes the evolution of application and services in step with the evolution of the underlying wireless access technology.

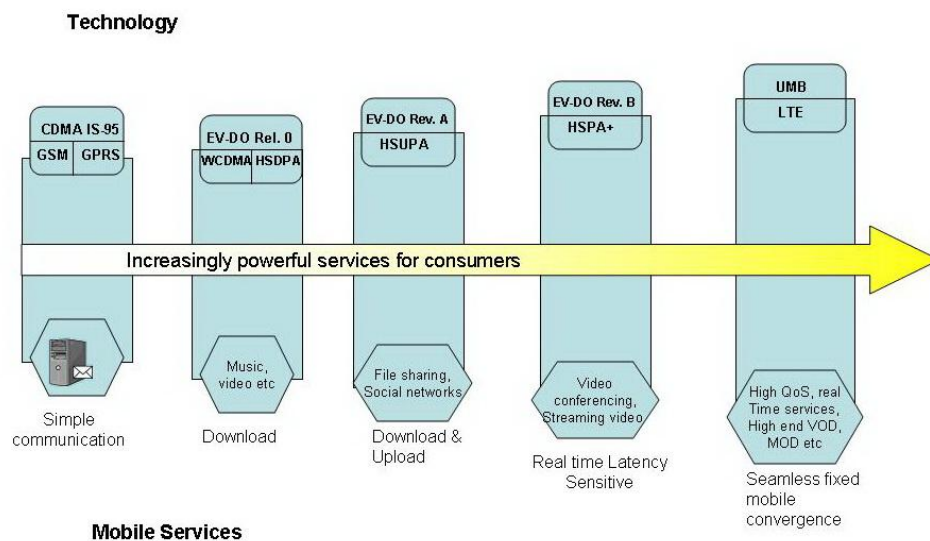


Figure Evolution of Wireless Telephone technologies and Services [16]

Features

- Peak download rates up to 299.6 Mbit/s and upload rates up to 75.4 Mbit/s depending on the user equipment category (with 4×4 antennas using 20 MHz of spectrum). All terminals will be able to process 20 MHz bandwidth.
- Low data transfer latencies, lower latencies for handover and connection setup time than with previous radio access technologies.
- Improved support for mobility, exemplified by support for terminals moving at up to 350 km/h.
- OFDMA for the downlink, SC-FDMA for the uplink to conserve power.

- Support for both FDD and TDD communication systems as well as half-duplex FDD with the same radio access technology
- Support for all frequency bands currently used by IMT systems by ITU-R.
- Increased spectrum flexibility: 1.4 MHz, 3 MHz, 5 MHz, 10 MHz, 15 MHz and 20 MHz wide cells are standardized.
- Supports at least 200 active data clients in every 5 MHz cell.
- Simplified architecture: The network side of E-UTRAN is composed only of eNodeB's.
- Support for inter-operation and co-existence with legacy standards.
- Packet switched radio interface.

Architecture LTE

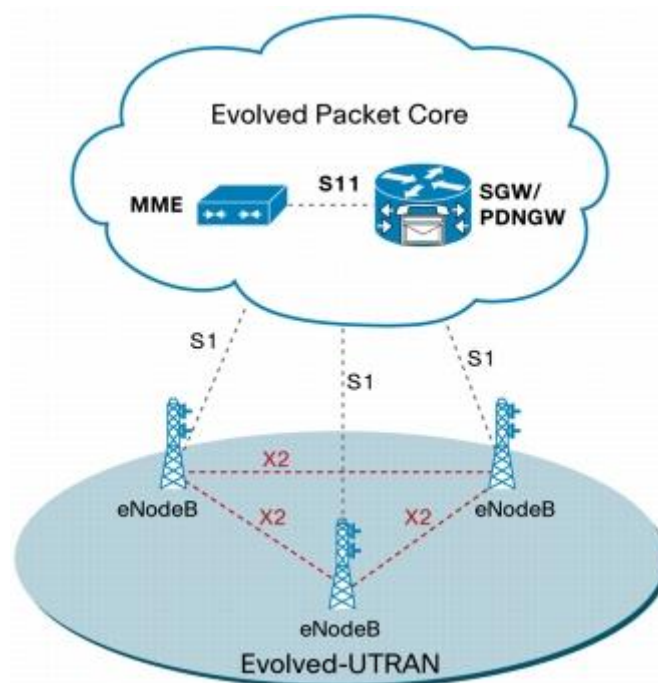


Figure LTE/EPC Reference Architecture [17]

The architecture of the access network is composed of a single network entity called Evolved NodeB (eNB) that establishing the E-UTRAN base station. In this way, all the functionality of the access network are included in E-UTRAN base station, unlike the access networks GSM and UMTS comprised of base stations (BTS, NodeB) and equipments controllers (BSC and RNC).

An access network E-UTRAN is consisted of eNBs that provide connectivity between the user equipment (UE) and the EPC network backbone. An eNB communicates with the other elements of the system by three interfaces: E-UTRAN Uu, S1 and X2.

The design of the EPC core network is designed primarily to provide IP connectivity services through optimized network architecture that allows exploiting the new capabilities offered by the access network E-UTRAN. Moreover, the ability to access their services through other 3GPP access networks as outside the scope of 3GPP is considered another key factor in the designing of the architecture.

The core of the EPC system consists of three network entities: MME, S-GW and P-GW. These three entities, along with the main database of the 3GPP system called HSS, are the basic elements for IP connectivity between equipment connected via E-UTRAN and external networks that connect the EPC backbone. The functions associated with the user plane are concentrated in the two gateways (S-GW and P-GW), while the MME is responsible for the functions and signaling control plane.

The interconnection of access network E-UTRAN to the EPC is performed through the S1 interface. In particular, the S1-MME interface that supports the control plane terminates at the MME while the S1-U interface user plane ends at the S-GW.

OFDM basics

OFDM is a transmission multi-carrier multiplexing mechanism comprising a set of symbols on a set of subcarriers. Due to the orthogonality properties of these subcarriers, the simultaneous transmission of all symbols keeping separation capacity these from reception can be possible.

While this technique is well known from the 60s, its practical application in the field of wireless communications is much more recent. Nowadays it is the base for the multiple access technique OFDMA employed by the LTE system.

In this manner, the multiple access technique OFDMA can accommodate several simultaneous transmissions corresponding to different information flows traveling in different subcarriers.

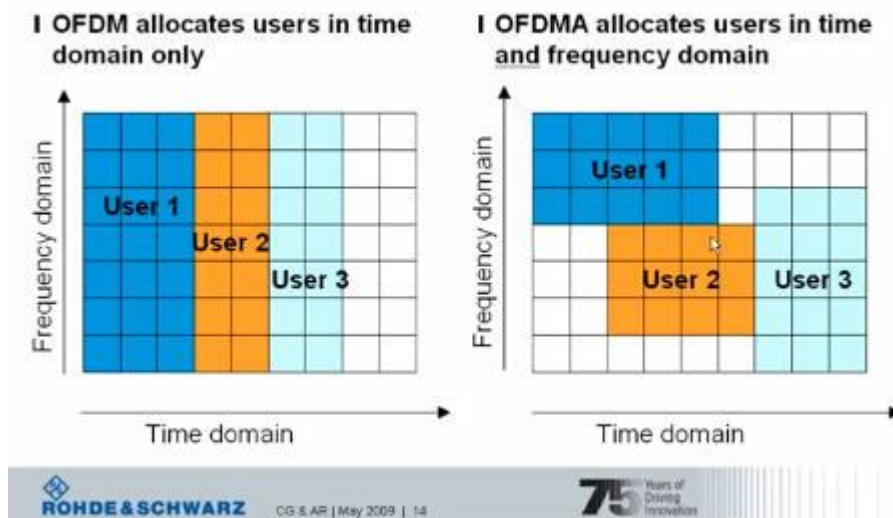


Figure OFDM vs OFDMA [18]

The use of multiple access OFDMA technique has the following advantages:

- Multiuser diversity: Allocating subcarriers to users is performed dynamically, and can be changed in short time periods through scheduling strategies.
- Frequency diversity: Since it is possible to assign single user non-contiguous subcarriers, enough separated for the state on the channel is independent, this provides frequency diversity.
- Robustness to multipath propagation: With the application of the cyclic prefix, the OFDMA technique is very robust against intersymbol interference resulting from multipath propagation and distortion can be combated through equalization techniques in the frequency domain.
- Flexibility in the allocated band: The OFDMA technique provides a simple way to accommodate different data rates to different users depending on the service requirements of each.
- High granularity in the assignable resources: By subdividing the total bandwidth in a high set of narrowband subcarriers that are dynamically allocated to users, there is a high granularity to allocate more or less resources to each.
- High utilization of the allocated band: Through the use of transmission OFDM the multicarrier transmission is achieved with a minimum spacing between the various subcarriers used.

It is also necessary to highlight some of the disadvantages of this technology:

- High ratio between instantaneous power and the average power.

- Susceptibility to frequency errors: Orthogonality OFDMA is based in that the spacing between subcarriers matches the inverse of the OFDMA symbol duration. Therefore, in the event that there are displacements in the frequency of the subcarriers regard on the reference frequency, so some loss of orthogonality and therefore interference between subcarriers will be resulted.

Radio Resource Control

The protocol Radio Resource Control is responsible for controlling the behavior of the mobile when it is in the operating mode "connected state". The main functions of the RRC protocol are:

- Broadcasting of the information generated in the so-called Information System.
- Connection Control, which involves all the procedures related to establishing, maintaining and closing a RRC connection.
- Managing mobility between access technologies controlled by the network.
- Managing measures configuration mechanisms and mechanisms of information transfer in the case of mobility between Radio technologies, such as inter and intra frequency.

Physical Resource Block

It is called Physical Resource Block the smallest element of information that may be assigned by the eNB to a mobile terminal. A PRB occupies 180 KHz band equivalent to twelve subcarriers 15KHz equi-spaced between them, and it transmitted 6 or 7 OFDMA symbols, depending on the length of cyclic prefix. The duration of a PRB is 0.5 ms.

A physical resource block (PRB) has 7 symbols associated with 12 subcarriers each one, it is had a total of 84 resources available in which to place the symbols. Assuming the use of the modulation spectrum efficiency, i.e. 64 QAM that transmitted 6 bits / symbol, a PRB can transmit up to 504 bits, which provides a gross rate of transmission peak of about $\text{PRB} = 504 \text{ bits} / 0.5 \text{ ms} \sim 1 \text{ Mb} / \text{s}$.

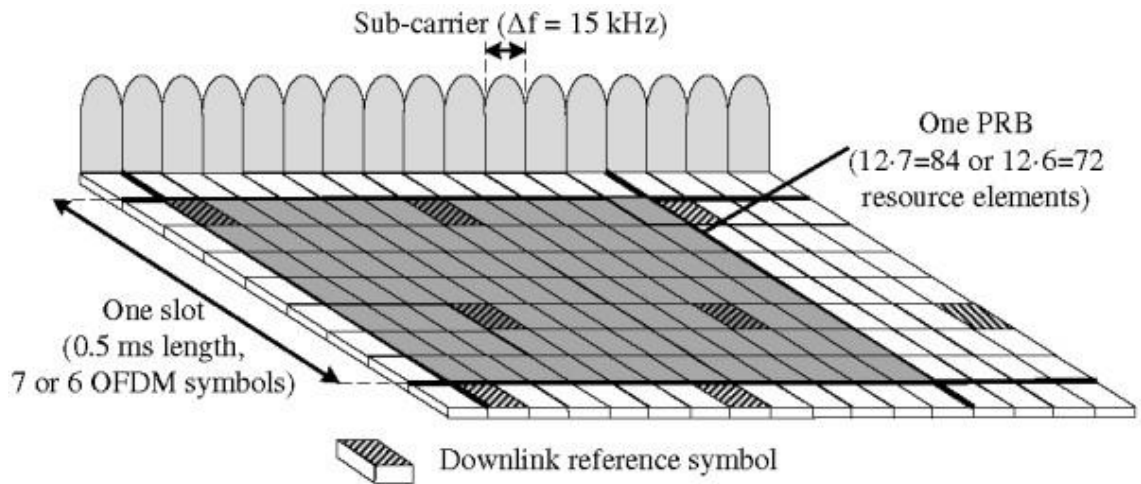


Figure Physical resource block in LTE system. [19]

Frame structure

In the time domain, the physical resources of the LTE system are organized according to two possible frame structures:

- Frame Structure 1: For FDD, the frame is consisted of 20 slots (slots, TS) with a duration each: $T_{\text{slot}} = 15360 \cdot T_s = 0.5 \text{ ms}$. Two consecutive intervals form a subframe (subframe, SF) lasting $T_{\text{SF}} = 1 \text{ ms}$. This time of 1 ms is the reference to form transport blocks that are called TTI (Transport Time Interval).
- Frame structure 2: For TDD, the frame is consisted of 2 half-frames of 5 ms each. Each half-frame is divided into five subframes of 0.5 ms (0-4 and 5-9). Subframes 1 and 6 are special with 3 data fields: DwPTS: Downlink Pilot Time Slot. GP: Guard Period. UpPTS: Uplink Pilot Time Slot. Those are used for signaling / control.

Downlink

It will be described the main features of the physical signals that allow the mobile terminal synchronized the system and consistently demodulating the signals OFDM transmitted in downlink.

Reference signals or pilot symbols are used for:

- Obtaining quality measurements on the downlink

- Estimating the channel impulse response for demodulation / coherent detection.
- Implementing mechanisms for cell search and initial synchronization.

The synchronization signal is used to facilitate the process system time synchronization (mainly frame and sub-frame level) . This signal is broken down into:

- Primary SCH that allow the temporary subframe level synchronization by methods of correlation between the received signal and a sequence of reference stored in the receiver.
- Secondary SCH that enable the temporal synchronization at the frame level, using the same methodology of temporal correlation.

The P-SCH signal is generated from a Zadoff-Chu sequence whose length is 63 which has been removed its central element. It is transmitted using 62 subcarriers central of band used by the system, leaving unoccupied central subcarrier.

The S-SCH signal is always associated with a P-SCH signal. It uses maximum length sequences or m-sequences. Each secondary synchronization sequence is obtained as a result of interlace, in the frequency domain, one maximum-length sequences whose length is 31 and the corresponding cyclically shifted version.

Moreover, the secondary signal is transmitted twice per frame suitably spaced in time slots to facilitate temporal synchronization in a frame level. The sequence of length 62 used in each symbol is not exactly the same due to the fact that it differs in the way it is generated.

Channel Name	Description
Physical Downlink Shared Channel (PDSCH)	User data and control information
Physical Multicast Channel (PMCH)	Data to multiple devices in a specific area (such as digital radio and mobile TV)
Physical Broadcast Channel (PBCH)	Broadcast information to all mobiles in a coverage area
Physical Downlink Control Channel (PDCCH)	Control messages

Physical Control Format Indicator Channel (PCFICH)	Channel configuration information
Physical Hybrid ARQ Indicator Channel (PHICH)	Retransmission flow control status information

Table Summary of the downlink physical channels [20]

Initial synchronization procedure and parameter acquisition

The first action that a mobile LTE should do after activated is searching a cell to connect. This procedure is intended to:

- Synchronizing in time and frequency at the physical layer level to the mobile terminal with transceiver located in the eNB of the cell that the mobile terminal wants to connect it.
- Acquiring the temporal synchronization frame and subframe level.
- Determining the physical identity of the cell.

Starting from the primary synchronization signal, which is transmitted using the 62 subcarriers centrals, and using a correlation process, the temporal position of the same is detected. In the case of operating in FDD mode, the primary synchronization signal always appears in the latest OFDMA symbol of the first and eleventh time slot of each frame, so allowing the mobile terminal to meet the time limits at the level of slot. Similarly, in the case of operating in TDD mode, the primary synchronization signals appear in the third symbol of the third and thirteenth slots.

Furthermore, with detection of the primary synchronization channel P-SCH, the mobile terminal also performs the following functions:

- Correcting frequency offsets introduced into the signal received by the RF heads of transmitters and receivers and adjusting the center frequency of the radio channel
- Symbol synchronization acquisition.

The following functions are performed with the detection of secondary synchronization channel:

- Frame boundary detection.
- Detection of cell identifiers group (Cell group ID)

General objectives

The main objective of this project is performing unsynchronization of signal LTE in downlink in a MATLAB simulation, approximating as closely as possible the behavior of the simulation to a real system of LTE fourth generation. To achieve this aim, it has been established the following phases:

- Searching and analyzing of all bibliographic information on LTE.
- Finding a complete simulation of the LTE system in downlink at the physical level.
- Planning aspects of the design that have to be included in the simulator for unsynchronization.
- Development of the designed system and performing various simulations to analyze the results.

1. INTRODUCCIÓN

En un periodo muy corto de tiempo, las comunicaciones inalámbricas móviles han conseguido recorrer un camino muy largo, primero de la mano de GSM y luego con el despliegue definitivo de UMTS. Ahora la telefonía móvil acaba de entrar en su cuarta generación, este vertiginoso avance se debe en gran parte a que las redes fijas cableadas no han sido capaces de responder a las demandas de movilidad y ubicuidad de los usuarios. Prueba de este cambio, ha sido la evolución de las redes de telefonía móvil. La primera generación de telefonía móvil utilizaba tecnología analógica y fue lanzada en los 80. La segunda generación cambia la telefonía móvil de analógica a digital, introduce capacidad y cobertura, e integra otros servicios, que anteriormente eran independientes, en la misma señal, como es el caso del envío de mensajes de texto o Pagina en un servicio denominado Short Message Service o SMS y una mayor capacidad de envío de datos desde dispositivos de fax y módem. El protocolo más conocido es GSM. La tercera generación, que ofrece la transmisión de voz y datos mediante UMTS. Finalmente, la cuarta generación de la que el sistema LTE, cuya primera especificación fue concluida por 3GPP a finales de 2008, puede considerarse el primer eslabón en una supuesta trayectoria evolutiva que debe culminar con el LTE-Advanced.

Son muchas las variantes que LTE introduce en relación a sistemas de comunicaciones móviles, sin embargo dos aspectos relevantes que cabría destacar son que en LTE, por primera vez, todos los servicios, incluida la voz, se soportan sobre el protocolo IP, y que las velocidades de pico de la interfaz radio se sitúan dentro del rango de 100 Mb/s y 1Gb/s, ampliamente superiores a las conseguidas en los sistemas predecesores. Se espera que con LTE se puedan romper finalmente y definitivamente las barreras que todavía impedían la consecución plena de una movilidad con capacidad multimedia. Lo que sería equivalente a afirmar que con la aparición de LTE los usuarios que lo deseen ya no tendrán que verse penalizados en su capacidad de comunicación por el hecho de ser móviles en lugar de fijos.

1.1 Motivación

La motivación para este TFG fue conseguir familiarizarse primero con esta tecnología, y después, conseguir un sistema que desincronice la señal, que actúa como un inhibidor. Debido a lo reciente de esta tecnología todavía no existen tantos inhibidores como en GSM y UMTS.

Es necesaria la creación de estos inhibidores, porque hay lugares que por motivos de seguridad se debe inhibir la señal, como en hospitales, comisarias, cárceles, etc. De aquí surge este trabajo, los inhibidores deben evolucionar a la par de la tecnología.

1.2 Objetivo

El objetivo principal de este proyecto consiste en realizar la desincronización de la señal LTE en el enlace descendente en una simulación MATLAB, aproximando lo más posible el comportamiento de la simulación a un sistema real LTE de cuarta generación. Para poder alcanzar este objetivo, se han establecido unos hitos que deben cumplirse:

- Búsqueda y análisis de toda la información bibliográfica sobre LTE.
- Búsqueda de una simulación completa del sistema LTE en el canal descendente a nivel físico.
- Planificar los aspectos del diseño que se van a incluir en el simulador, para realizar la desincronización.
- Desarrollo del sistema diseñado y realizar diferentes simulaciones para analizar los resultados.

1.3 Estructura de la memoria

Se espera que la organización del trabajo consiga ser lo más comprensible y asequible para el lector o consultor.

- **Capítulo 1.** Se realiza una pequeña introducción sobre LTE y se detalla la motivación y los objetivos del trabajo.
- **Capítulo 2.** Se explican las características que debe cumplir el nuevo sistema LTE.
- **Capítulo 3.** Estado del arte, donde se hace un pequeño estudio de la evolución de las otras tecnologías y se expone el marco regulador de la seguridad con las señales radioeléctricas.
- **Capítulo 4.** Se detalla la arquitectura del sistema LTE y los elementos por los que está compuesto.
- **Capítulo 5.** Se presenta a nivel físico los fundamentos de las tecnologías utilizadas en el sistema LTE.
- **Capítulo 6.** Se explica el concepto de bloque de recursos físicos y como está compuesto.
- **Capítulo 7.** Se hace un análisis del enlace descendente, enlace en el cuál el trabajo se centra.

- **Capítulo 8.** Se explica los procedimientos básicos asociados a la interfaz aire que realiza el terminal móvil al activarse.
- **Capítulo 9.** Se detallan las fases del proyecto, explicando las tareas realizadas y los resultado obtenidos.
- **Capítulo 10.** Conclusión del trabajo.

2. CARACTERISTICAS DEL SISTEMA

- Alta eficiencia espectral
 - OFDM en el enlace descendente, que es robusto frente a las múltiples interferencias y además, tiene alta afinidad a las técnicas avanzadas como la programación de dominio frecuencial del canal dependiente (scheduling), y MIMO, más sencillas de implementar con un OFDM.
 - “Single-Carrier FDMA”, en el enlace ascendente, disminuye el PAPR, y al igual que en el enlace descendente, tiene gran afinidad a las técnicas avanzadas como MIMO y el scheduling.
 - Tiene varias aplicaciones con Multi-antena.
- Muy baja latencia
 - Valores 10 ms para el plano de usuario y de 100 ms para el plano de control, es decir pasar de estado sin disponible (idle) al estado activo en este tiempo
- Separación del plano de usuario y el plano de control mediante interfaces abiertas.
- Ancho de banda adaptativo
 - 1.4, 3, 5, 10, 15 y 20 MHz
- Trabaja en muchas bandas frecuenciales diferentes.
- Compatibilidad con otras tecnologías de 3GPP.
- Red de frecuencia única OFDM.
- Velocidades de pico:
 - Downlink: 300 Mbps usando antenas MIMO 4x4, 150 Mbps usando antenas MIMO 2x2.
 - Uplink: 86,5 Mbps
- Óptimo para desplazamientos hasta 15 km/h. Puede funcionar a altas velocidades hasta los 500 km/h
- En una celda más de 200 usuarios. Cada celda de 5 MHz.
- Celdas de 100 a 500 km. Tamaño óptimo de las celdas 5 km. LTE solo soporta hard-handover.
- Retransmisiones más robustas en caso de errores con el mecanismo del ARQ híbrido (HARQ).

- QoS asegurada.
- LTE utiliza la técnica de Conmutación por paquetes IP, al igual que 3G (excluyendo las comunicaciones de voz), la red completa prevista es todo IP “all IP”.
- Las operadoras UMTS pueden usar más espectro, hasta 20 MHz.
- Simplificación de la arquitectura E-UTRAN y descentralización de la misma.
- Mejora y flexibilidad del uso del espectro (FDD y TDD), realizando una gestión más eficiente del mismo, pudiendo incluir servicios unicast y broadcast. Reducción en coste de análisis e implementación y alta fidelidad para redes de Banda Ancha Móvil.

3. ESTADO DEL ARTE

3.1 Evolución de las tecnologías e inhibidores

Los primeros sistemas de telefonía móvil civil empezaron en los años 40 y eran sistemas de radio analógicos que utilizaban en el primer momento modulación en amplitud y posteriormente modulación en frecuencia. Los primeros equipos eran enormes y pesados, por lo que estaban destinados casi exclusivamente a su uso a bordo de vehículos.

Los equipos 1G en los años 80 seguían utilizando canales de radio analógicos con modulación en frecuencia. Era el primer sistema del mundo de telefonía móvil tal como se entiende hasta hoy en día.

En la década de 1990 surge la segunda generación. Esta generación dio paso a las comunicaciones digitales que ofrecen una mejor calidad de voz que las analógicas, además se aumenta el nivel de seguridad y se simplifica la fabricación del Terminal. La gran diferencia es que con la tecnología digital se hizo posible hacer Multiplexión, por lo que en un canal antes destinado a transmitir una sola conversación a la vez se hizo posible transmitir varias conversaciones de manera simultánea, incrementando así la capacidad operativa y el número de usuarios que podían hacer uso de la red en una misma celda en un momento dado. En Europa el estándar que se usó fue el GSM.

Después se optó por una generación intermedia, 2.5G que introducía la capacidad de transferencia de datos del sistema con servicios como la mensajería multimedia que permitía el envío de melodías, imágenes y videos.

La tercera generación nace de la necesidad de aumentar la capacidad de transmisión de datos para poder ofrecer servicios como la conexión a Internet desde el móvil, la videoconferencia, la televisión y la descarga de archivos. El sistema que se adopta es UMTS.

Finalmente, se llega a la cuarta generación que está basada completamente en el protocolo IP, siendo un sistema y una red, que se alcanza gracias a la convergencia entre las redes de cables e inalámbricas.

Según la definición de inhibidor, es un dispositivo electrónico que impide o dificulta las radiocomunicaciones en un determinado espectro de frecuencias mediante interferencias intencionadas. Algunos de los tipos de esta interferencia son ruido aleatorio, pulso aleatorio, CW, tonos, pulsos y chispas.

El más común es el ruido aleatorio, que consiste en transmitir ruido a gran potencia junto con la señal de transmisión, para que el receptor no sea capaz de sincronizarse, y por consecuencia no se pueda establecer la comunicación.

Es posible que en determinadas edificios sea necesaria la cancelación de comunicaciones en ambos sentidos. Principalmente para evitar el espionaje y las comunicaciones no autorizadas con el exterior. El método más seguro conocido es la jaula de Faraday.

La jaula de Faraday se basa en el efecto por el cual el campo electromagnético en el interior de un conductor en equilibrio es nulo, anulando el efecto de los campos externos. Por lo que, el uso de este fenómeno es muy útil a la hora de inhibir señales externas en un edificio.

3.2 Marco regulador

Podríamos situar el marco legal en el que se presenta este trabajo, en torno a las especificaciones que se presenta en las Releases 8 y 9 del 3GPP, correspondientes a la tecnología LTE.

Para la seguridad de señales radioeléctricas, quienes emitan directa o indirectamente señales en un espacio radioeléctrico deberán cumplir con los estándares de seguridad y radiación establecidos por los Ministerios de las Tecnologías de la Información y las Comunicaciones, Salud y la Organización Mundial de la Salud. Que tiene como finalidad, generar control, vigilancia y seguimiento a cada una de las entidades que interactúan con las telecomunicaciones.

Sobre la legalidad del uso de inhibidores, la Unidad Central de Seguridad Privada del Ministerio de Interior indica lo siguiente al respecto de la utilización de este tipo de dispositivos:

"Los dispositivos inhibidores de frecuencia sólo pueden ser usados por las Fuerzas y Cuerpos de Seguridad y Administraciones Públicas autorizadas, por lo que, en la actualidad, todos aquellos que se estén utilizando fuera de esta excepción, y sin la autorización expresa de la Secretaría de Estado de Telecomunicaciones, se encuentran al margen de la legislación vigente, pudiendo aplicarse, en consecuencia, previa denuncia, el correspondiente régimen sancionador por parte del organismo competente."

4. ARQUITECTURA DEL SISTEMA LTE

4.1 Introducción

En este apartado se describe la arquitectura de una red de comunicaciones móviles basada en las especificaciones del sistema LTE.

El término LTE empezó al inicio en 3GPP para denominar un estudio que se centraba en la evolución de la red de acceso de UMTS, denominada como UTRAN. Formalmente, la nueva red de acceso es denominada con el nombre de E-UTRAN, aunque también es utilizado muchas veces el término LTE en las especificaciones como sinónimo de E-UTRAN.

Lo mismo ocurre con la red troncal, 3GPP utilizó el término SAE para referirse a las actividades de estudio relacionadas con la especificación de una red troncal evolucionada de conmutación de paquetes. Formalmente, dicha red troncal se denomina EPC.

4.2 Arquitectura general de los sistemas celulares

En los sistemas celulares hay tres elementos principales que constituyen la arquitectura.

- Equipo de usuario. El usuario puede acceder a los servicios que ofrece la red mediante un dispositivo. Dicho dispositivo tendrá una tarjeta que denominamos tarjeta SIM, que contiene la información necesaria para conectarse a la red y poder disfrutar de los servicios ofrecidos por nuestro proveedor. Se conectará a la red a través de la interfaz radio.
- Red de acceso. Es una parte del sistema que realiza la comunicación, vía radio, con los equipos de usuario para proporcionar la conexión con la red troncal. Es la encargada de gestionar los recursos radio para que estén utilizables, para poder proporcionar los servicios portadores de una manera eficiente. Esta red de acceso está compuesta por estaciones bases y por equipos controladores de estaciones base.
- Red troncal. Es otra parte del sistema que se ocupa del control de acceso a la red celular, como puede ser la gestión de la movilidad de los usuarios, la autenticación de los usuarios, control y señalización asociada al servicio de

telefonía, gestión de la interconexión, etc. Los equipos que constituyen esta red acogen funciones de conmutación de circuitos, bases de datos, routing, etc

4.3 Arquitectura general del sistema LTE

La idea es la misma que en las otras generaciones, dividir el sistema en los tres elementos mencionados anteriormente. Formado por un equipo de usuario, una red de acceso que llamaremos E-UTRAN, y una red troncal que denominaremos EPC.

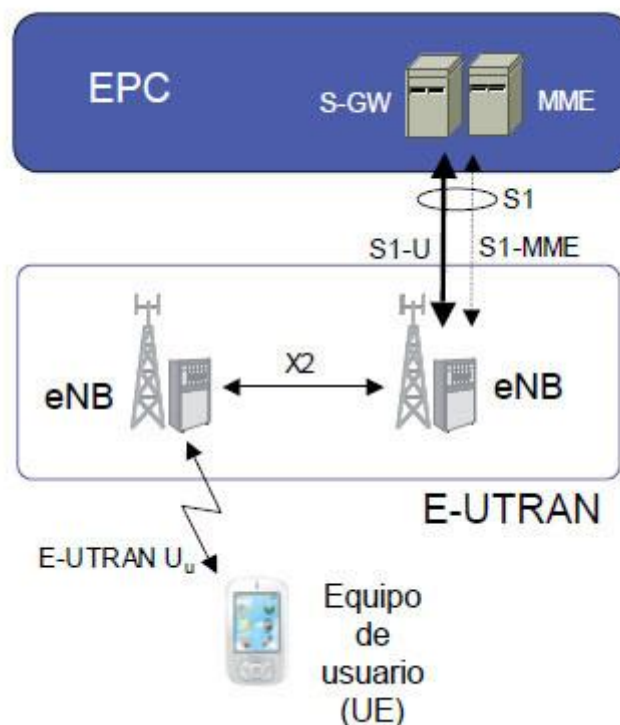


Figura 4.1 Red de acceso E-UTRAN [3]

A continuación, se nombra alguna de las principales características de las que está compuesta la arquitectura del sistema LTE:

- Arquitectura E-UTRAN única: EPS(Evolved Packet System)
- Toda la red basada en paquetes, aunque deberá soportar sistemas que admitan tráfico conversacional y en tiempo real.
- Los evolved node B (eNB), proporcionan la terminación de los protocolos hacia UE.
- Mediante la interfaz X2 están interconectados entre sí.
- Soportan el traspaso de los UE en el modo activo.
- Los eNB a través de la interfaz S1 se conectan con el núcleo de red evolucionado EPC (Evolved Packet Core)
- Las funciones del eNB son básicamente:

almacenar temporalmente los paquetes IP de los usuarios cuando los terminales estén en modo *mode idle*, y el encaminamiento del tráfico de usuario. El SGW también es un punto de monitoreo de las políticas de conexión y servicio establecidas en el PCRF.

P-GW- Esta entidad es la encargada de proporcionar conectividad entre la red LTE y las redes externas. El PGW asigna la dirección IP al UE. Es quién aplica las reglas de uso de la red y control de tarificación a los servicios portadores que tenga fijado el terminal. La pasarela P-GW actúa de punto de anclaje para la gestión de movilidad entre LTE y redes no 3GPP.

OFCS- Nodo de recogida de la información de tarificación para su siguiente transferencia al sistema de facturación.

OCS- Nodo de control para el suministro de servicios que requieren tarificación online.

HSS- El HSS almacena y administra todo lo relativo a los datos de suscripción de los usuarios. La información comprendida en el HSS engloba tanto información relativa a la suscripción del usuario como información necesaria para la propia operativa de la red. La base de datos HSS es consultada, y cambiada, desde las diferentes entidades de red encargadas de suministrar los servicios de conectividad o servicios finales.

PCRF- Elemento central del sistema de control de uso de la red (policy control) y control de tarificación.

4.5 Red de Acceso evolucionada: E-UTRAN

La arquitectura de la red de acceso E-UTRAN está compuesta por una única entidad, en este caso las estaciones bases, que denominaremos *evolved NodeB (eNB)*.

La interfaz permite el envío de información por el canal radio entre el eNB y los equipos de usuario. En el eNB se implementan las funciones y protocolos necesarios para controlar la operativa de la interfaz y para realizar el envío de datos.

A diferencia de las otras redes de acceso GSM y UMTS, que necesitan en su red de acceso estaciones bases (BTS, NodoB) y equipos controladores (BSC y RNC), para poder realizar la transmisión de información. Con eNB integra toda la funcionalidad necesaria. Esta diferencia se representa en la figura 4.3.

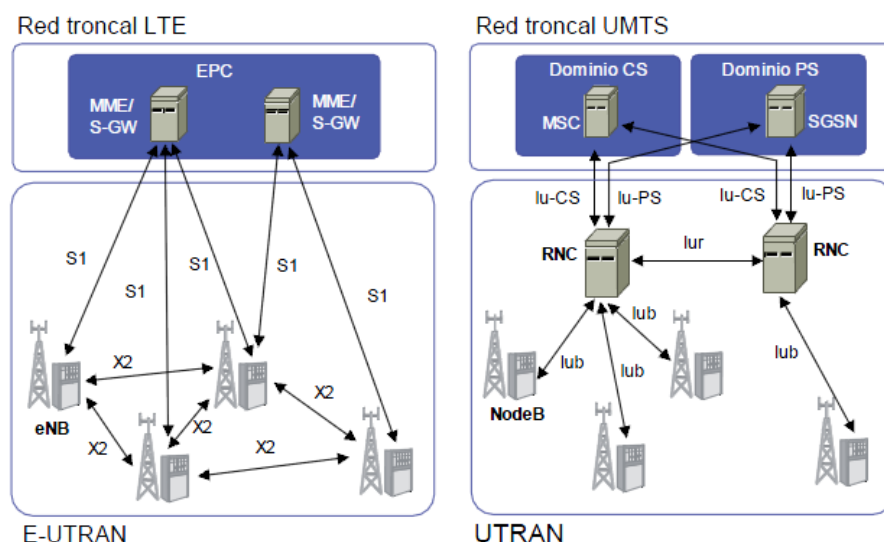


Figura 4.3 Comparativa de la arquitectura de red de E-UTRAN y UTRAN [3]

El eNB se comunica a la red troncal EPC a través de la interfaz S1. Dicha interfaz está compuesta realmente por dos interfaces distintas, para poder realizar la separación entre el plano de control y plano de usuario. La interfaz S1-U pertenece al plano de usuario, dicha interfaz alude a la torre de protocolos utilizada para el envío de tráfico de usuario a través de esta. Por otro lado, la interfaz S1-MME pertenece al plano de control que alude a la torre de protocolos necesaria para mantener las funciones y procedimientos indispensables para gestionar la operación de la entidad correspondiente. Esta separación entre plano de control y plano de usuario de la interfaz S1 posibilita la creación de la conexión del eNB con dos nodos diferentes de la red troncal. Además que dicha separación posibilita dimensionar de manera independiente los recursos de transmisión indispensables para el envío de tráfico de los usuarios y para el soporte de la señalización del sistema.

También está la opción de que puedan conectarse los eNBs entre sí a través de la interfaz X2. En dicha interfaz, los eNBs se intercambian los mensajes de señalización cuyo objetivo es una gestión más eficiente del uso de los recursos radio, así como el tráfico de los usuarios del sistema cuando se encuentran en un proceso de *handover*.

4.6 Equipos de usuario

El equipo de usuario es el equipo que concede a los usuarios del sistema LTE el acceso a los servicios de la red LTE mediante la interfaz radio. La arquitectura funcional es la misma que se definió en los sistemas GSM y que posteriormente se adaptó al sistema UMTS. Esta arquitectura se muestra en la figura 4.4. El equipo de usuario contiene dos elementos básicos: un módulo SIM y un ME. Las funciones del equipo móvil se juntan en dos entidades funcionales: la terminación móvil y el equipo terminal.

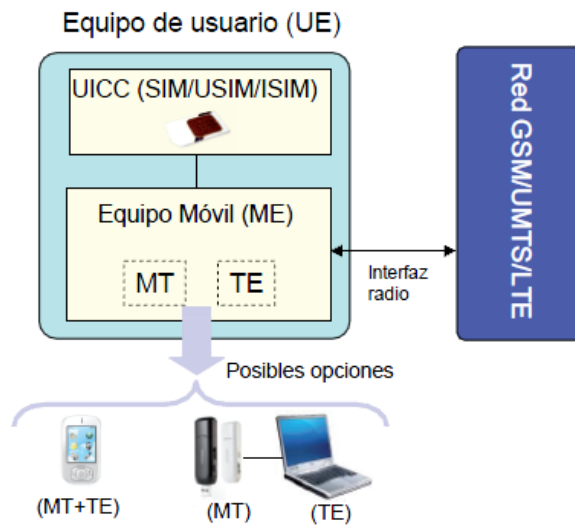


Figura 4.4 Equipo de usuario [3]

- El módulo de subscripción de usuario, se materializa a través del uso de una tarjeta inteligente que gestiona los datos de subscripción de los usuarios a las redes 3GPP. Esta tarjeta se denomina SIM para acceder a redes GSM y UMTS-SIM para acceder a redes UMTS.
- El equipo móvil, constituye las funciones propias de comunicación con la red celular, también otras funciones adicionales que concede la interacción del usuario con los servicios de la red. Para poder introducir un grado de flexibilidad en el diseño del equipo móvil, se ha fijado una interfaz que permite que haya una separación física entre el equipo, en la cual están las funciones propias de la comunicación (MT) y el equipo que realiza la interacción con el usuario (TE).

5. TECNOLOGIAS DE NIVEL FISICO

La capa física del sistema LTE se apoya en el uso de técnicas de acceso múltiple OFDMA en el enlace descendente y SC-FDMA en el enlace ascendente. En los dos casos las subportadoras tienen una separación fija e igual a 15 KHz. El número de subportadoras disponibles varía según la canalización del sistema, como indica la siguiente tabla 5.

Canalización	1,4 MHz	3 MHz	5 MHz	10 MHz	15 MHz	20 MHz.
Tamaño FFT	128	256	512	1024	1536	2048
Número de subportadoras disponibles	73	181	301	601	901	1201

Tabla 5 Canalización en el sistema LTE [3]

La capa física del sistema LTE está pensada para operar en bandas altas de UHF, por encima de los 450MHz y hasta los 3,5 GHz.

Los esquemas de modulación son: 64-QAM, 16-QAM y QPSK para el *downlink*, y 16-QAM y QPSK para el *uplink*.

5.1 Fundamentos de OFDM

La Multiplexación por División de Frecuencias Ortogonales, en inglés Orthogonal Frequency Division Multiplexing, es una multiplexación que consiste en enviar un conjunto de ondas portadoras de diferentes frecuencias, donde cada una transporta información, la cual es modulada en QAM o en PSK.

Normalmente se realiza la multiplexación OFDM tras pasar la señal por un codificador de canal con el objetivo de corregir los errores producidos en la transmisión, esta multiplexación se denomina *Coded OFDM*.

Debido al problema técnico que supone la generación y la detección en tiempo continuo de los cientos, o incluso miles de portadoras equiespaciadas que forma OFDM, los procesos de multiplexación y demultiplexación se realizan en tiempo discreto mediante la IDFT y la DFT respectivamente.

En la actualidad es usada en sistemas como la Televisión Digital Terrestre según el estándar DVB-T o las redes inalámbricas de área local según los estándares IEEE 802.11 a/g. Esta técnica constituye la base para el OFDMA empleada por el sistema LTE.

La figura 5.1 expone un ejemplo con el módulo de los espectros correspondientes a un conjunto de 6 subportadoras OFDM. A la vez, la figura 5.2 enseña la evolución temporal de la parte real de las 6 subportadoras.

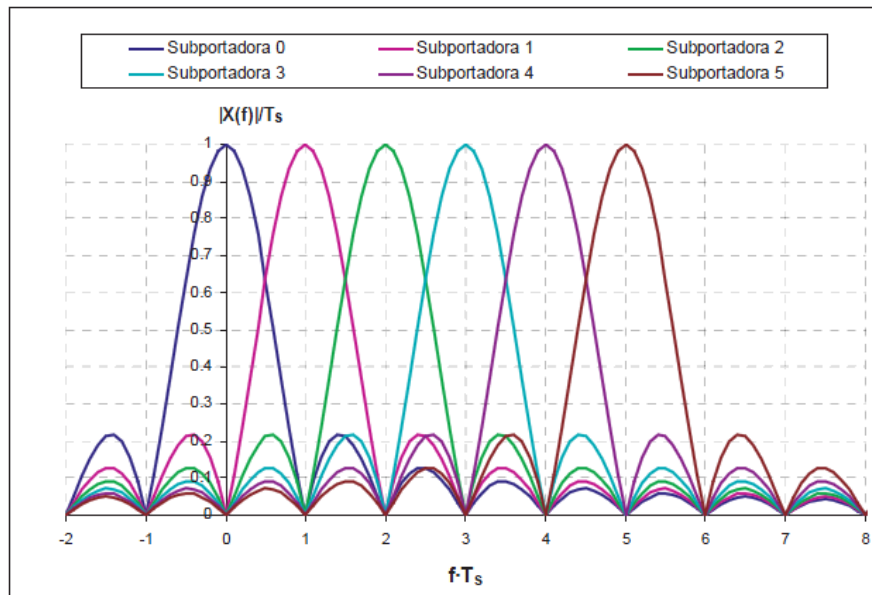


Figura 5.1 Ejemplo del espectro correspondiente a 6 subportadoras OFDM [3]

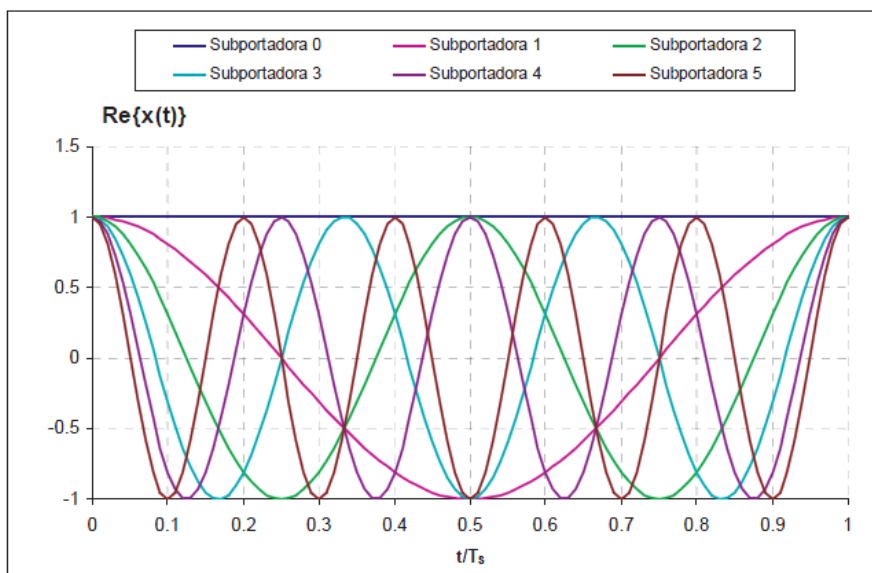


Figura 5.2 Ejemplo de la señal temporal correspondiente a 6 subportadoras OFDM [3]

5.2 OFDMA como técnica de acceso múltiple para el enlace descendente

La técnica de acceso múltiple OFDMA, usada en el *downlink* de LTE, surge de forma natural a partir de la modulación OFDM mostrada anteriormente al considerar la posibilidad de que los diferentes símbolos modulados sobre las subportadoras pertenezcan a usuarios distintos. De esta forma, es factible acomodar varias

transmisiones simultáneas correspondientes a diferentes flujos de información al viajar en subportadoras diferentes.

La utilización de la técnica de acceso múltiple OFDMA supone las siguientes ventajas:

- **Diversidad multiusuario:** A través de OFDMA la asignación de las subportadoras a usuarios es llevado dinámicamente, permitiendo cambiarse en períodos cortos de tiempo dicha asignación mediante estrategias de *scheduling*. De esta manera, como el canal radio presentará desvanecimientos aleatorios en diferentes subportadoras y que estos desvanecimientos serán independientes para cada usuario, se intentará seleccionar para cada subportadora el usuario que ofrezca un mejor estado del canal, lo que supondrá una mejor utilización de la banda disponible para obtener una mayor velocidad de transmisión, es decir, una mayor eficiencia espectral. Dicho procedimiento se suele denominar *scheduling* en el dominio de la frecuencia. .
- **Diversidad frecuencial:** Como se ha comentado antes, es posible asignar a un mismo usuario subportadoras no contiguas, para que el canal sea independiente tiene que estar suficientemente separadas, lo que otorga diversidad frecuencial.
- **Robustez frente a la propagación multicamino:** Gracias a la aplicación del prefijo cíclico, la técnica OFDMA es muy robusta frente a la interferencia intersimbólica resultante de la propagación multicamino, esta distorsión se puede combatir mediante técnicas de ecualización en el dominio de la frecuencia, estas técnicas son mejores que las técnicas de ecualización clásicas en el dominio temporal, y resultan más eficientes cuando se realiza una transmisión de banda ancha, como puede ser transmisiones superiores a 5 MHz, como ocurre con LTE.
- **Flexibilidad en la banda asignada:** Con la técnica OFDMA existe una forma sencilla de acomodar diferentes velocidades de transmisión a los distintos usuarios en función de los requerimientos de servicio de cada uno, únicamente a base de asignar más o menos subportadoras por usuario.
- **Elevada granularidad en los recursos asignables:** Como la banda total se subdivide en un conjunto elevado de subportadoras de banda estrecha que son asignadas dinámicamente a los usuarios, se tiene una elevada granularidad a la hora de asignar más o menos recursos, lo que resulta útil para colocar servicios con diferentes requerimientos de calidad.

- Elevado grado de utilización de la banda asignada: Gracias al empleo de la transmisión OFDM la transmisión multiportadora se obtiene con un espaciado mínimo entre las diferentes subportadoras utilizadas, hallándose de hecho una cierta superposición en el espectro ocupado por éstas sin que ello afecte a la recuperación de la señal transmitida.
- Sencillez de implementación en el dominio digital: Esto es así debido a la posibilidad de emplear chips que efectúan los procesos de FFT/IFFT de forma rápida.

En esta tecnología también es necesario precisar algunas de las desventajas que presenta:

- Elevada relación entre la potencia media y la potencia instantánea: una de las desventajas de las técnicas de transmisión multiportadora como OFDMA es que la potencia instantánea transmitida puede ser muy superior a la potencia media, lo que supone problemas de linealidad para los amplificadores de potencia, que limita su eficiencia e incrementa su coste.
- Susceptibilidad frente a errores de frecuencia: La ortogonalidad en OFDMA está basada, en que la separación entre subportadoras coincide con el inverso de la duración del símbolo OFDMA. Por este motivo, en el caso de que existan desplazamientos en la frecuencia de las subportadoras en relación a su frecuencia de referencia, supondrá una cierta pérdida de ortogonalidad y la consiguiente interferencia entre subportadoras. La razón de estos errores en frecuencia pueden ser diferentes, y por ella la disponibilidad de mecanismos de sincronización eficientes para hacer frente a estos errores en frecuencia es uno de los aspectos importantes a tener en cuenta.

6. CONCEPTO DE BLOQUE DE RECURSOS FÍSICOS

En LTE el recurso físico básico, es bidimensional: tiempo-frecuencia. Se denomina Bloque de recursos RB (Resource Block) o PRB (Physical Resource Block). Está constituido por:

- 12 subportadoras en el dominio de la frecuencia, separadas 15 KHz entre sí. Anchura de banda: $12 \times 15 = 180$ KHz.
- 1 Intervalo (TS) en el dominio del tiempo, de 0,5 ms con 6 ó 7 símbolos.

En el caso del MBMS, el RB tiene 24 subportadoras separadas 7,5 KHz. La anchura total es también 180 KHz.

El recurso elemental se llama elemento de recursos: RE (Resource Element), que es una subportadora modulada en el tiempo de un símbolo. Cuando se envían 7 símbolos por slot (caso habitual), las dimensiones del RE, son:

$$15 \text{ kHz} \times \frac{0.5}{7} \text{ ms}$$

En consecuencia un RB consta de $12 \times 7 = 84$ RE con dimensiones de $(12 \times 15) \text{ KHz} \times 0,5 \text{ ms}$.

El PRB se describe en términos de la rejilla de recursos (Resource Grid). Cada elemento de la rejilla se denomina Elemento de Recurso (Resource Element, RE). Un RE es una subportadora modulada con M niveles ($M = 4, 16, 64$ según sea QPSK, 16 QAM o 64 QAM) en el tiempo de un símbolo, la rejilla tiene:

$$NRE = NRB \times NSCRB \times NSCSymb$$

Elementos de recursos

$$NRB=1 \quad NRBSC=12 \quad NSCSymb=7 \quad NRE=1 \times 12 \times 7=84$$

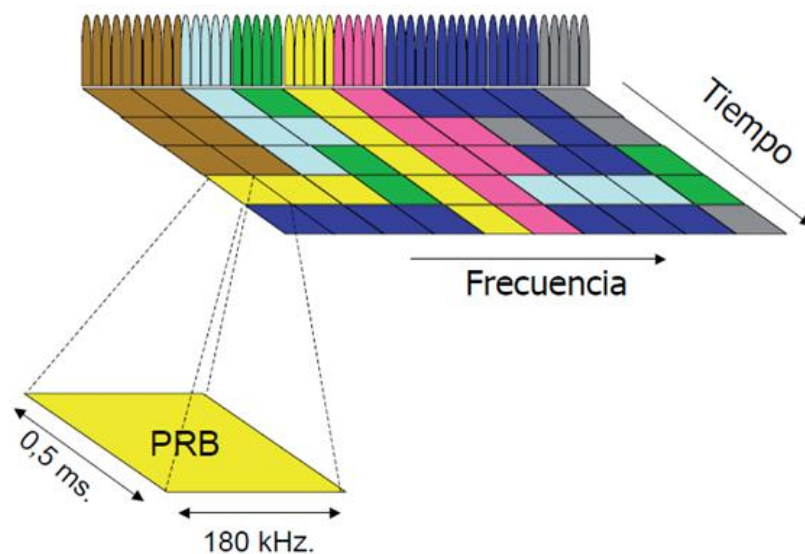


Figura 6.1 Concepto de Radio Bloque [3]

El número de bloques de recursos físicos disponible en el sistema depende de la canalización tal como se indica en la siguiente tabla 6.1:

Canalización	1,4 MHz	3 MHz	5 MHz	10 MHz	15 MHz	20 MHz.
Número de PRB	6	15	25	50	75	100

Tabla 6.1 Número de PRBs en función de la canalización [3]

Hay que subrayar que el número de subportadoras disponibles, y el número de PRB, indicado en la tabla 6.1, están relacionados. El número de subportadoras es 12 veces el número de PRBs más una, ya que hay que considerar que la subportadora central (ó subportadora DC) de la banda disponible no se utiliza para transmitir información. La subportadora DC se utiliza para facilitar los mecanismos de ajuste y sincronización en frecuencia del receptor.

Ya que en un bloque de recursos físicos disponemos de 7 símbolos con 12 subportadoras asociadas a cada uno de ellos, tenemos en total de 84 recursos disponibles en donde ubicar los símbolos QPSK, 16QAM o 64 QAM. Suponiendo que utilizamos la modulación de mayor eficiencia espectral, es decir 64 QAM que transmite 6 bits/símbolo, resulta que en un PRB podemos llegar a transmitir hasta 504 bits, incluyendo datos codificados de usuario, canales de control y señalización propia de la capa física del sistema, cada 0,5 ms, lo que proporciona una velocidad bruta de transmisión de pico de aproximadamente $PRB=504\text{bits}/0,5\text{ ms} \approx 1\text{ Mb/s}$.

Por consiguiente, tomando en consideración el número de radiobloques indicados en la tabla 6.2, las velocidades de pico globales en la interfaz aire para las distintas canalizaciones son:

Canalización	1,4 MHz	3 MHz	5 MHz	10 MHz	15 MHz	20 MHz.
Velocidad de Pico Total (Mb/s)	$\cong 6$	$\cong 15$	$\cong 25$	$\cong 50$	$\cong 75$	$\cong 100$
Velocidad de pico bruta de usuario (Mb/s) (15% de los recursos destinados a control y señalización)	$\cong 5,1$	$\cong 12,8$	$\cong 21$	$\cong 42,5$	$\cong 63,7$	$\cong 85$

Tabla 6.2 Velocidades de pico posibles en función de la canalización [3]

6.1 Estructura de Trama

En el dominio temporal los recursos físicos del sistema LTE se estructuran siguiendo dos posibles estructuras de trama:

- Estructura de trama 1: Para FDD, la trama consta de 20 intervalos (slots, TS) con una duración cada uno: $T_{\text{slot}} = 15360 \cdot T_s = 0,5 \text{ ms}$. Dos intervalos consecutivos forman una subtrama (subframe, SF) que dura $T_{\text{SF}} = 1 \text{ ms}$. Este tiempo de 1 ms es el de referencia para formar los bloques de transporte y se llama TTI (Transport Time Interval).

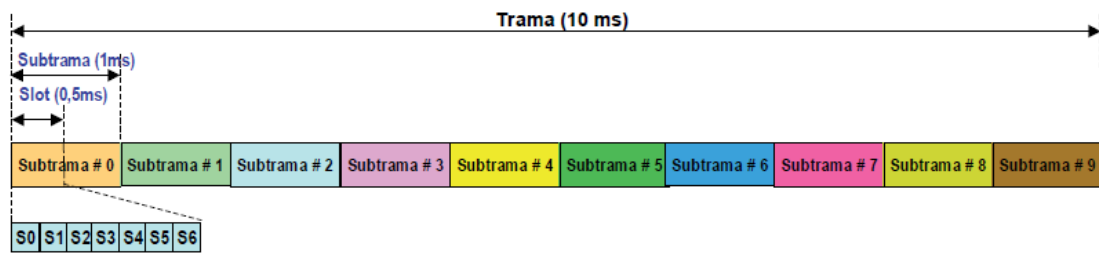


Figura 6.2 Estructura de trama tipo 1 [3]

- Estructura de trama 2: Para TDD únicamente, consta de 2 semitramas de 5 ms cada una. Cada semitrama se subdivide en 5 subtramas de 0,5 ms. (0 - 4 y 5 - 9). Las subtramas 1 y 6 son especiales con 3 campos de datos: DwPTS: Downlink Pilot Time Slot. GP: Guard Period. UpPTS: Uplink Pilot Time Slot. Que se emplean para señalización/control.

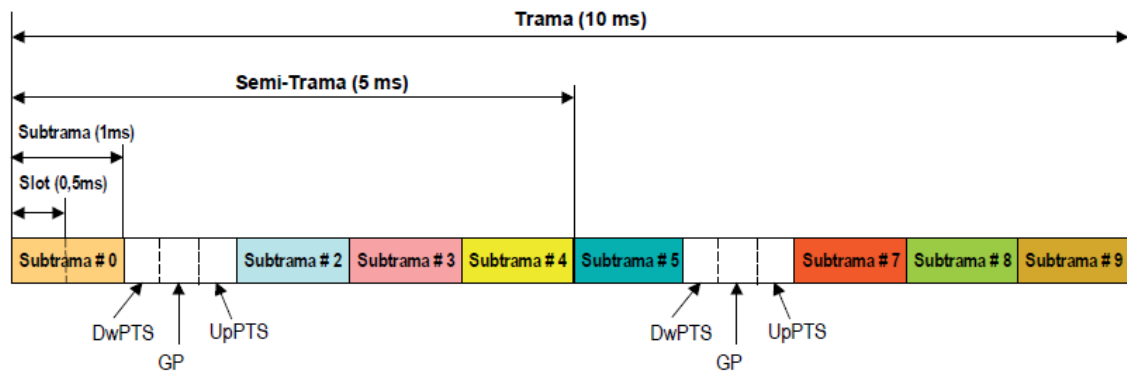


Figura 6.3 Estructura de trama tipo 2 [3]

7. ENLACE DESCENDENTE

En esta sección se va a describir las principales características de las señales físicas con las cuales el terminal móvil puede sincronizarse al sistema y demodular coherentemente las señales OFDMA transmitidas en el *downlink*. Asimismo, se van a revisar las principales características de los procedimientos físicos (canales físicos) que se utilizan para transportar la información destinada a los usuarios que se encuentran en

la zona de cobertura de su correspondiente eNB, así como de los mecanismos de señalización y control que permiten una transmisión eficiente y controlada de la información.

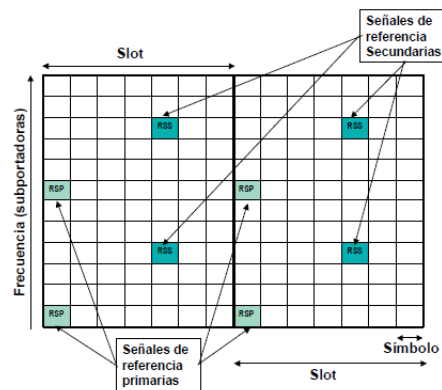
7.1 Señales Físicas en el enlace descendente

7.1.1 Señales de Referencia (RS)

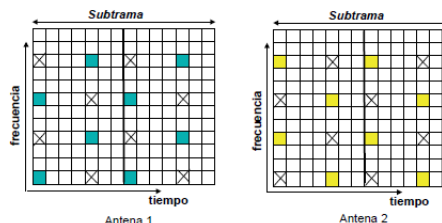
Las señales de referencia o símbolos piloto se usan para:

- Obtener medidas de calidad en el *downlink*.
- Estimar la respuesta impulsional del canal para demodulación/detección coherente.
- Implementar mecanismos de búsqueda de celda y sincronización inicial.

Las señales de referencia se sitúan en determinados recursos elementales (una subportadora y un símbolo) y mantienen una separación en el dominio de la frecuencia de seis subportadoras.



(A) Caso de una única antena. El ejemplo muestra las señales de referencia para una subtrama con 12 subportadoras



(B) Caso de multiplexado espacial con dos antenas. Como en el caso anterior se muestra un ejemplo con 12 subportadoras para una subtrama. Los recursos frecuencia-tiempo marcados con "X" indican que no se transmite en ellos.

Figura 7.1. Ejemplos de ubicación de las señales de referencia [3]

- La separación temporal de los símbolos de referencia tiene que ser 0,5 ms. Quiere decir que por lo menos hay que ubicar un símbolo de referencia por slot.
- Para la dimensión frecuencial, entre símbolo de referencia la separación es de 6 subportadoras, hablando en frecuencia quiere decir 90 KHz.

7.1.2 Señal de Sincronización (SCH)

- P-SCH: Esta señal a nivel de subtrama permite la sincronización temporal, utilizando procedimientos de correlación entre una secuencia de referencia guardada en el receptor y la señal recibida.
- S-SCH: Permite a nivel de trama la sincronización temporal, mediante la misma metodología de correlación temporal.

La señal P-SCH se genera a partir de una secuencia de Zadoff-Chu de longitud 63 de la cual se ha eliminado el elemento central. Para poder separar esta señal de otras señales transmitidas usando el resto de subportadoras, se deben dejar 5 subportadoras vacías a su derecha e izquierda, que ejercen como bandas de guarda. Por eso se dice en algunos casos que la señal P-SCH ocupa 72 subportadoras.

La señal S-SCH se asocia siempre a una señal P-SCH. Cada secuencia secundaria de sincronización se logra como resultado de entrelazar, en el dominio de la frecuencia, una secuencia de máxima longitud de longitud 31 y su debida versión desplazada cíclicamente. Esta señal utiliza 72 subportadoras como en P-SCH.

La modulación en cada subportadora es BPSK.

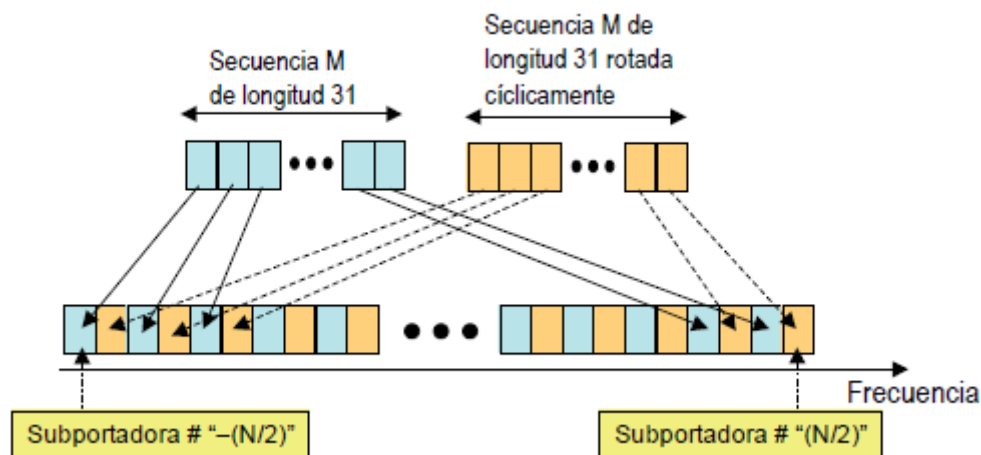


Figura 7.2 Secuencia de Sincronización Secundaria [3]

Finalmente, señalar que la señal S-SCH indica la identidad, de la celda a la que se sincroniza el terminal móvil. El primer procedimiento que se realiza al conectar el terminal móvil es el procedimiento de sincronización y adquisición inicial de parámetros, las señales que se detectan en primer lugar son las de sincronización primaria y secundaria, por lo tanto la identificación de celda definida por éstas señales se utilizará para identificar en qué recursos se van a situar las señales de referencia primarias (RSP) y secundarias (RSS).

Cabe destacar que, al situar ambas señales de sincronización en el centro del radiocanal disponible, es más fácil la sincronización de los terminales móviles a la red, aparte de cuál sea el número de subportadoras con las que operen estos terminales móviles.

7.2 Canales Físicos en el enlace descendente

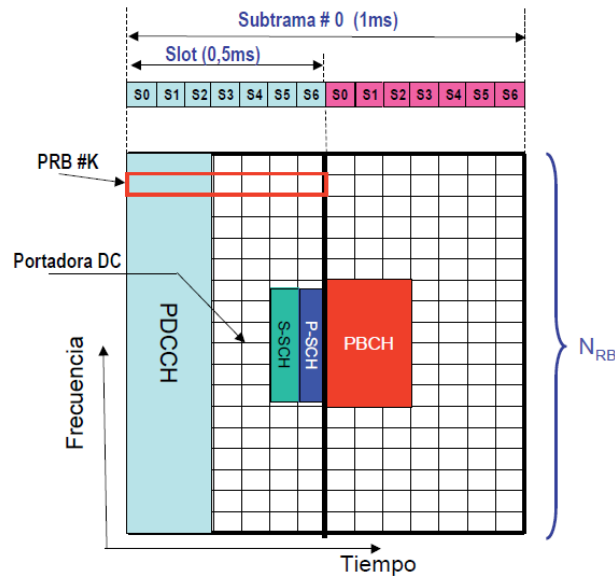
Nombre Canal	Descripción
<i>Physical Downlink Shared Channel</i> (PDSCH)	Transmite información de usuario, de control tanto dedicada como común (p.e., aviso o <i>paging</i> , y de ciertos parámetros de radiodifusión)
<i>Physical Multicast Channel</i> (PMCH)	Se utiliza para transportar información MBMS destinada a los usuarios unicast en redes isofrecuencia (SFN)
<i>Physical Broadcast Channel</i> (PBCH)	Transporta la información de radiodifusión básica de la red, que permite la conexión inicial de un terminal móvil a la misma.
<i>Physical Downlink Control Channel</i> (PDCCH)	Canal de control genérico del enlace descendente. Informa sobre los recursos en el enlace descendente asignados al PDSCH.
<i>Physical Control Format Indicator Channel</i> (PCFICH)	Informa al terminal móvil sobre el número de símbolos (1,2 ó 3) utilizados para transmitir el PDCCH.
<i>Physical Hybrid ARQ Indicator Channel</i> (PHICH)	Transporta información de reconocimientos (ACK/NACK) correspondientes a las transmisiones del enlace ascendente.

Tabla 7.1 Resumen de los canales físicos del enlace descendente [3]

En primer lugar las señales P-SCH y S-SCH, se transmiten mediante 62 subportadoras, que se encuentran a la izquierda y derecha de la subportadora central y en los símbolos 6 y 5 del primer *Time Slot* de las subtramas numeradas como #0 y #5, respectivamente. Se asegura que, aparte del ancho de banda del sistema considerado, los terminales móviles siempre podrán localizar dichas señales de sincronización, incluso aunque en un principio no conozcan el ancho de banda del sistema al que quieren acceder. El sistema tiene estandarizados diferentes anchos de banda disponibles y por ese motivo el terminal móvil durante el mecanismo inicial de sincronización no tiene porque saber el número de subportadoras con que trabaja el sistema, esta información la difundirá después el canal de radiodifusión (PBCH).

El canal de radiodifusión (PBCH) se encuentra en los símbolos 0, 1, y 2 del segundo *Time Slot* de la subtrama numerada como #0. En este canal son 72 subportadoras también, situadas 36 a la derecha y 36 a la izquierda de la subportadora central. El canal de radiodifusión aparece en seguida después de las señales de sincronización, ya que en este canal es importante conocer su contenido, que estima los parámetros básicos del sistema, para luego poder realizar cualquier intercambio de información/señalización con la red. Además es necesario subrayar que, en estas 72 subportadoras PBCH también se encuentran las señales de referencia.

Evidentemente en el recurso frecuencia-tiempo donde se encuentran dichas señales de referencia no se transmite ningún bit del canal PBCH.



Ubicación en la estructura frecuencia-tiempo de los canales comunes de control y señales de referencia para el enlace descendente

Figura 7.3 Ubicación en la estructura frecuencia-tiempo de los canales comunes de control y señales de referencia para el enlace descendente [3]

En la figura 7.4 se puede observar como en algunas posiciones de la rejilla frecuencia-tiempo de la subtrama se encuentran dichas señales de referencia. Evidentemente no se puede transmitir ningún símbolo o bit asociado a estos canales.

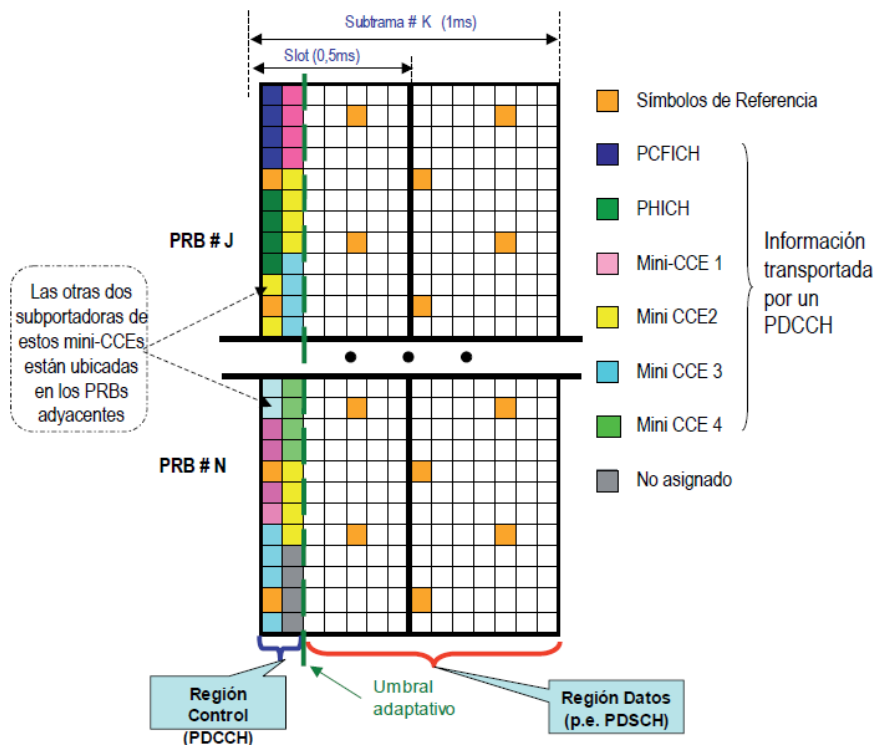


Figura 7.4 Detalle de la ubicación del contenido del canal PDCCH, considerando que ocupa sólo dos símbolos OFDMA [3]

Finalmente, cabe destacar que el sistema LTE está diseñado para obtener un alto grado de compatibilidad entre los procedimientos a nivel de capa física aplicados en ambos modos TDD y FDD. Por lo tanto, cuando se opera en modo TDD, la señal P-SCH se muestra en el tercer símbolo de las subtramas especiales, y la S-SCH de sincronización se muestra tres símbolos antes que la primaria. También, hay que destacar qué, en modo TDD el canal de radiodifusión (PBCH) aparece en la primer subtrama de la estructura de trama.

8. PROCEDIMIENTOS BÁSICOS ASOCIADOS A LA INTERFAZ AIRE

8.1 Procedimiento de sincronización y adquisición inicial de parámetros

Lo primero que va a realizar un terminal móvil LTE después de activarse es una búsqueda de celda a la que conectarse. Con este procedimiento se pretende:

- La sincronización en frecuencia y tiempo a nivel de capa física del terminal móvil con el transceptor ubicado en el eNB de la celda a la que dicho terminal desea conectarse.
- Obtener la sincronización temporal a nivel de trama y subtrama.
- Definir la identidad física de la celda.



Figura 8.1 Procedimiento de sincronización y adquisición inicial de parámetros [3]

A partir de la señal P-SCH, que se envía usando las 62 subportadoras centrales, y usando un proceso de correlación, se detecta la posición temporal de esta. Si se está operando en modo FDD la señal P-SCH siempre se encuentra en el último símbolo OFDMA del primer y undécimo *slot* de cada trama, de esta manera se permite que el terminal móvil conozca los límites temporales a nivel de *slot*. De la misma forma, en el caso de estar utilizando el modo TDD las señales de sincronización primarias se encuentran en el tercer símbolo en el tercer y decimotercer *slot* y por lo tanto, de la misma forma que antes, el terminal móvil puede fijar los límites de cada *slot* con la detección de estas señales.

Además, el terminal móvil gracias a la detección del canal de sincronización primario P-SCH, puede realizar las consiguientes funciones:

- Corrección de *offsets* de frecuencia que se introducen en la señal recibida por los cabezales de RF transmisores y receptores así como el ajuste de la frecuencia central del radiocanal.
- Adquisición del sincronismo de símbolo.

Con la detección del canal de sincronización secundario S-SCH se realizan las siguientes funciones:

- Detección del límite de trama. Hay que tener en cuenta que para esto la señal S-SCH se envía en el penúltimo símbolo de los *slots* #0 y #10, que esto corresponde a la primera y sexta subtrama, y también que los símbolos de la secuencia de 62 bits asociados a estas señales SCH están intercambiados entre símbolos pares e impares según sea utilizados en los *slots* #0 ó #10. Con esto se está buscando que una vez haya sido detectado el contenido de la secuencia de 62 bits asociada a la señal S-SCH, de forma automática se conozca en que *slot* se ha detectado esta secuencia de sincronización secundaria y por lo consiguiente la posición de la señal de sincronización secundaria con respecto al inicio de la trama.

- Detección del grupo de identificadores de celda. Ciertamente, a partir de la detección de los 62 símbolos de la secuencia asociada a la señal S-SCH es factible conocer a cuál de los 168 posibles esquemas pertenece esta señal y por consiguiente determinar la identificación física de la celda (Cell-ID).

8.2 Procedimiento de acceso aleatorio

8.2.1 Acceso basado en contienda

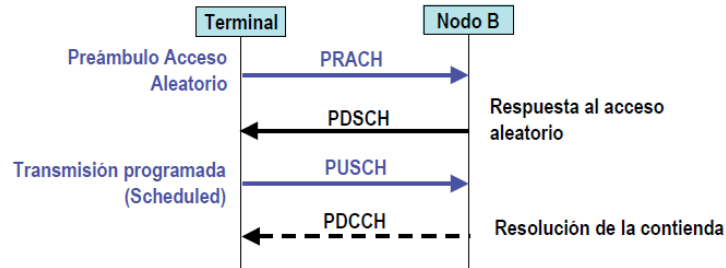


Figura 8.2 Acceso basado en contienda [3]

1. En primer lugar se transmite un preámbulo de acceso PRACH usando los bloques de acceso destinados a tal fin. Esta secuencia PRACH se escoge, de forma aleatoria, entre un grupo de hasta 64 posibles secuencias. El nivel de potencia con que el móvil transmite este preámbulo PRACH se define sobre una estimación inicial de las pérdidas de propagación del enlace, usando para ello las señales de referencia transmitidas en el *downlink*.
Si no se obtiene una respuesta del eNB al envío del preámbulo PRACH, a partir de un tiempo el terminal móvil repite la transmisión aumentando el nivel de potencia transmitida. A este mecanismo se le denomina *Power Ramping*.
2. La respuesta a la petición del preámbulo PRACH incluye un duplicado de dicho preámbulo usado por el móvil, que lo identifica, información para el *time advance* de las siguientes transmisiones por parte del móvil, una asignación inicial del *temporary C-RNTI*, alias que usa el terminal móvil para identificarse en la red, y también una asignación inicial de recursos en el *downlink*, imprescindible para la transmisión programada que sigue a continuación.
3. Posteriormente, el terminal móvil envía un informe al eNB, a través de un paquete PUSCH sujeto a mecanismos de HARQ, sobre su identidad y tiene la posibilidad de solicitar una actualización del área de seguimiento o solicitar el establecimiento de una conexión a nivel RRC. Para esto utiliza el canal de transporte UL-SCH asignado por el Nodo B para este fin.

8.2.2 Acceso regulado

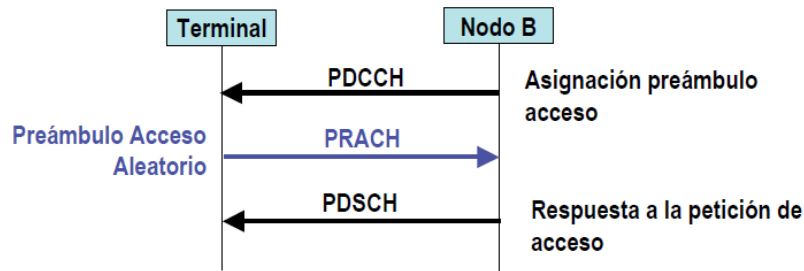


Figura 7.3 Acceso regulado [3]

El proceso de acceso regulado es semejante al caso anterior, con la diferencia de que en este modo de operación no hay opción de colisión ya que el terminal móvil usa un PRACH previamente asignado por el eNB.

En este caso, el proceso lo inicia el eNB quien establece la secuencia preámbulo del paquete de acceso. Posteriormente el terminal, usando la secuencia PRACH asignada, transmite un paquete de acceso PRACH siguiendo el mismo proceso que el explicado para el acceso basado en contienda. Como respuesta el eNB transmite la respuesta a la petición de acceso, igual que como ocurre en el caso del acceso en contienda. Sin embargo ahora el procedimiento finaliza en este punto, puesto que como es el eNB quien lo ha iniciado, ya conoce la identidad del terminal móvil y ha podido establecer, si se requiere, la debida asignación de recursos para dicho terminal móvil.

9. DESARROLLO DEL TRABAJO

9.1 Fase 1: Búsqueda y análisis de toda la información bibliográfica sobre LTE.

La primera fase consistió en buscar toda la información bibliográfica sobre LTE, la cual no fue fácil de encontrar debido a lo reciente de la tecnología, aunque en estos últimos años ha sufrido un auge. Además, la especificación es muy extensa y llevó tiempo estudiarla.

Para poder realizar la introducción y explicación a LTE, que se ha podido ver anteriormente, se tiene que realizar un análisis de toda la información de LTE y agruparla por términos, para hacer un resumen extenso de toda la tecnología LTE necesaria para comprender este trabajo.

Una vez analizada la información se determinó que el orden para explicar LTE sería:

- Requisitos previos: Imprescindible conocer las características del sistema para comprender la magnitud de la tecnología LTE.
- Arquitectura del sistema LTE: Estudiando la arquitectura LTE, podemos compararla con otras tecnologías como la de UMTS o GSM, y ver las diferencias que hay de una tecnología a otras. También es necesario estudiar los componentes que componen la arquitectura y las interfaces por las cuales se comunican, así como el funcionamiento de cada uno.
- Tecnologías de nivel físico: Se presenta a nivel físico los fundamentos de las tecnologías utilizadas en el sistema LTE, y que establecen una de las principales diferencias en cuanto a sistemas predecesores, permiten obtener mayores niveles de capacidad y eficiencia en la utilización de los recursos radio.
- Técnicas de acceso múltiple OFDMA: Técnica usada para el enlace descendente, en el cual nos vamos a centrar. Esta técnica está basada en la técnica de transmisión OFDM, la cual también es necesario saber sus propiedades, para comprender mejor la técnica OFDMA.
- Concepto de bloque de recursos físicos: Se denomina PRB y es el mínimo elemento de información que el eNB puede asignar a un terminal móvil. Es necesario entender este concepto porque en él se transmite 6 ó 7 símbolos OFDMA, dependiendo del prefijo cíclico. Y la duración de este elemento es de 0,5 ms, lo equivalente a un *slot*.
- Enlace Descendente: Fundamental en este trabajo para entender las principales características de las señales físicas que permiten al terminal móvil sincronizarse al sistema y demodular coherentemente las señales OFDMA.
- Procedimientos básicos asociados a la interfaz aire: En esta parte se explica los procedimientos que realiza el terminal móvil al activarse, para sincronizarse, adquirir los parámetros iniciales e identificarse en una red.

9.2 Fase 2: Búsqueda y análisis de una simulación completa del sistema LTE en el canal descendente a nivel físico.

La segunda fase consistió en la búsqueda de una simulación completa en el enlace descendente a nivel físico. Finalmente, tras una larga búsqueda se encontró un simulador Downlink Physical Layer. Después se procedió al estudio y análisis de este simulador para comprender como realizaba la simulación.

Cuando se ejecuta la simulación, previamente se puede elegir el tipo de simulación, el número de subtramas y la SNR que tendrá. Después la simulación carga los parámetros según se haya elegido el tipo de configuración, una vez cargados todos los parámetros los inicializa y finalmente realiza la simulación del enlace descendente con la configuración correspondiente.

Se va a analizar el comportamiento del sistema en el modo SUSISO (Single-User Simple-Input Simple-Output) cambiando el tipo de configuración de canal. Añadimos ruido y analizamos cuantos ACKs recibe, para saber en qué momento se desincroniza.

Tipo PedA	
SNR (dB)	ACKs
0	0
4	0
8	26
12	48
16	64
20	72

Tabla 9.1 ACKs recibidos en función del SNR. Tipo PedA

La primera simulación que se realiza es con la configuración de canal de PedA, como se puede observar en la tabla la señal se desincroniza a los 4dB.

Tipo PedB	
SNR (dB)	ACKs
0	0
5	0
10	26
15	69
20	73

Tabla 9.2 ACKs recibidos en función del SNR. Tipo PedB

La segunda simulación que se realiza es con la configuración de canal de PedB, como se puede observar en la tabla 9.2 la señal se desincroniza a los 5dB, es muy parecida a la anterior debido a que las configuraciones son prácticamente igual.

Tipo VehA	
SNR (dB)	ACKs
0	0
3	0
7	26
12	48
17	64

Tabla 9.3 ACKs recibidos en función del SNR. Tipo VehA

La tercera simulación que se va a realizar es con la configuración de canal de VehA, como se puede observar en la tabla 9.3 la señal se desincroniza a los 3dB.

Tipo VehB	
SNR (dB)	ACKs
0	0
2	0
4	3
7	10
12	36
18	64

Tabla 9.4 ACKs recibidos en función del SNR. Tipo VehB

La cuarta simulación que se va a realizar es con la configuración de canal de VehB, muy parecida a la anterior y los resultados lo demuestran cómo se puede observar en la tabla 9.4, la señal se desincroniza a los 3dB.

Tipo AWGN	
SNR (dB)	ACKs
0	0
4	0
7	0
8	10
10	80
15	85

Tabla 9.5 ACKs recibidos en función del SNR. Tipo AWGN

La última simulación que se realiza es con la configuración de canal de AWGN, la señal se desincroniza a los 7 dB como se puede observar en la tabla 9.5.

9.3 Fase 3: Planificar los aspectos del diseño que se van a incluir en el simulador, para realizar la desincronización.

Para planificar los aspectos del diseño que se van a incluir en el simulador, primero debemos realizar algunas comprobaciones y elegir la configuración en el que vamos a operar.

Para nuestro diseño la configuración que se elige es el canal AWGN, para realizar las comprobaciones se debe utilizar dicha configuración y además, la variable SNR se va a dejar en 100 dB.

Lo primero que se va a comprobar, es en el archivo donde se realiza la sincronización en recepción, si la señal se desincroniza añadiendo ruido a la señal en recepción, y poniendo los valores anteriormente analizados. Efectivamente la señal en AWGN, se desincroniza para un valor de 7 dB en SNR recibiendo 0 ACKs.

La segunda comprobación que se va a realizar, es parecida a la anterior pero en este caso vamos añadir el ruido en la señal que se transmite. De esta manera la señal que enviamos con ruido, en recepción no es capaz de distinguir cual es la señal transmitida y no puede sincronizarse.

La última comprobación que se realiza, es enviando una señal de cancelación junto con la señal que se transmite. De esta manera cuando la señal que se transmite llega a la estación base, esta estación envía la señal de transmisión con la de cancelación. De esta forma, el receptor no es capaz de sincronizarse.

Para diseñar nuestro sistema nos vamos a basar en este hecho. Vamos a mandar una señal de cancelación junto con la señal de transmisión pero exclusivamente en el prefijo cíclico, de esta manera teóricamente la señal que se transmite con la cancelación de su prefijo cíclico y llega al receptor no es capaz de sincronizarse porque las señales de sincronización que van en el prefijo cíclico han sido canceladas.

9.4 Fase 4: Desarrollo del sistema diseñado y realizar diferentes simulaciones para analizar los resultados.

Para probar nuestro diseño, implementamos lo explicado anteriormente. Añadimos una señal de cancelación exclusivamente al prefijo cíclico en transmisión.

Hay que tener en cuenta que el prefijo cíclico tiene en el primer símbolo un número más que en el segundo símbolo, para poder añadir correctamente la señal de cancelación.

Primero hacemos una simulación, en la cual añadimos la señal de cancelación en el prefijo cíclico con un factor de 1, es decir, la señal de cancelación será exactamente igual a la señal de transmisión. De esta forma, la señal que se transmite se ve en la figura 9.1.

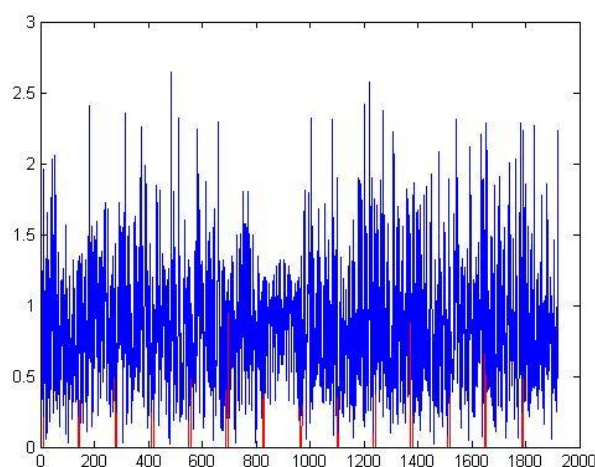


Figura 9.1 Señal de transmisión junto con la señal de cancelación

En la figura 9.1 la señal azul es la señal que se transmite y la señal en rojo es la señal de cancelación que se envía junto con la de transmisión.

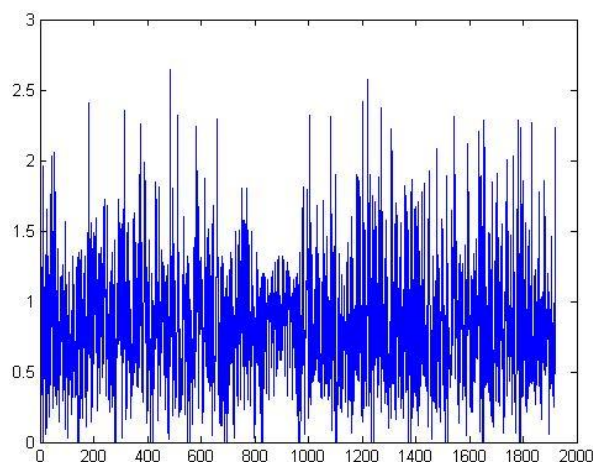


Figura 9.2 Señal que se recibe en recepción

En la figura 9.2 se ve la señal que se detecta en recepción, con los prefijos cíclicos a cero, gracias a la señal de cancelación. Como cabía esperar no es capaz de sincronizarse, debido a que la señal no tiene prefijos cíclicos y no puede detectar las señales de sincronización, por lo que no recibe ningún ACK. Variable donde comprobamos si el sistema ha sido capaz de sincronizarse.

A continuación, se va a realizar unas cuantas simulaciones para saber la flexibilidad que puede tener la señal de cancelación. Para ello se va a multiplicar un factor por dicha señal, y observaremos los resultados en el número de ACKs que recibe.

Señal de cancelación en el prefijo cíclico	
Factor	ACK
0.77	65
0.80	30
0.82	25
0.85	5
0.90	5
0.95	5
0.98	0
1	0

Tabla 9.6 ACKs recibidos según el Factor

Como se puede observar en la tabla, hasta el factor 0.82 se siguen recibiendo ACKs aunque van disminuyendo en número, pero a partir de este factor se ve un cambio abrupto en el número de ACKs que recibe, siendo prácticamente nulo.

Para finalizar, la señal se desincroniza a partir del factor 0.85 consiguiendo una desincronización completa en el factor 0.98. Entonces para desincronizarse, la señal de cancelación puede ser algo flexible llegando a poder usar un factor de 0.85, pero si queremos una desincronización completa hay poco margen de flexibilidad siendo el factor 0.98.

10. CONCLUSIÓN

En este trabajo se ha intentado encontrar una solución a una necesidad impuesta por la evolución de las tecnologías. Primero desde un análisis extenso de la tecnología LTE hasta la implementación de un sistema de desincronización de la señal que actúa como inhibidor.

La mayor dificultad de este trabajo se encuentra en la familiarización y comprensión de esta tecnología, debido a lo reciente de la misma. Además, encontrar una solución para poder desincronizar la señal, fue un proceso lento y largo.

Finalmente, se encontró un método por el cuál se podía desincronizar dicha señal en el enlace descendente que se detalla en el apartado 10.1.

10.1 Propuesta

La propuesta que se presenta en este trabajo, es la desincronización de la señal LTE en el enlace descendente. Mediante el envío de una señal de cancelación que anula exclusivamente el prefijo cíclico en la señal de transmisión.

De esta forma conseguimos, que enviando una señal de cancelación a partes selectivas de la señal, esta se desincronice. Por lo tanto, nuestro sistema es más eficiente que otros sistemas que consisten en añadir ruido hasta obtener la desincronización.

Como se ha visto, nuestro sistema requiere menos potencia que otros sistemas y permite un pequeño margen de flexibilidad en la señal de cancelación, para la desincronización de la señal.

10.2 Marco socio-económico

En este apartado se detalla el presupuesto asociado a la realización del presente trabajo fin de grado.

Se contabiliza tanto los costes de personal de quien lo desarrolla, como el material empleado para ello. A la suma de los costes directos de personal y material, se

suman los costes indirectos generados durante el periodo de trabajo. Estos costes se estiman en un 21% sobre el total.

Coste material

La realización de este TFG ha contado con recursos materiales. En la siguiente tabla 10.1 se recogen los costes de material desglosados.

Material	Coste
Ordenador	650€
Licencia Matlab (Academic Use)	500€
Documentación	100€
Total	1250€

Tabla 10.1 Presupuesto coste material

Coste personal

El coste del personal está principalmente asociado al trabajo realizado por un Ingeniero Junior y un Jefe de Proyecto. Teniendo en cuenta que el coste por hora de un Ingeniero Junior se aproxima a 30€ brutos y la de un Jefe de Proyecto a 60€ brutos. Se estima que se ha trabajado 4 horas al día sobre el proyecto, y el tiempo empleado en realizar el proyecto han sido 6 meses. Teniendo en cuenta que hay 20 días laborables por mes, deja un total de 480 horas. Por lo tanto, el coste personal asciende a 43200€.

Costes totales

Si se suma los costes de material, costes de personal y los costes indirectos se obtiene el presupuesto total del TFG y que se observa en la tabla 10.2.

Concepto	Presupuesto
Coste material	1250 €
Coste personal	43200 €
Coste indirecto	9334,5 €
Total	53784,5 €

Tabla 10.2 Presupuesto total del proyecto

Propuesta

Con nuestra propuesta de utilizar estos inhibidores de señal, se ahorra dinero. Debido a que es necesaria su utilización, porque como se ha visto hay lugares en los que la inhibición de señal es un requerimiento. Nuestra propuesta es eficiente en el uso de estos inhibidores y por consecuencia, supondría un ahorro.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] C. Mehlführer, M. Wrulich, J. C. Ikuno, D. Bosanska and M. Rupp, "Simulating the Long Term Evolution Physical Layer," in Proc. of the 17th European Signal Processing Conference (EUSIPCO 2009), Aug. 2009, Glasgow, Scotland. [Online]. Available: http://publik.tuwien.ac.at/files/PubDat_175708.pdf
- [2] C. Mehlführer, M. Wrulich, J. C. Ikuno, M. Simko, S. Schwarz and M. Rupp, "The Vienna {LTE} Simulators - Enabling Reproducibility in Wireless Communications Research," in EURASIP Journal on Advances in Signal Processing, Vol. 2011. [Online]. Available: http://publik.tuwien.ac.at/files/PubDat_199104.pdf
- [3] Ramón Agusti Comes, Fernando Bernardo Álvarez y otros "LTE: Nuevas tendencias en comunicaciones móviles. Fundación Vodafone España, 2010"
- [4] Guillermo Lorenzo López, "Diseño e implementación de un simulador en Matlab para el análisis de las capas física y enlace de LTE" Universidad Rey Juan Carlos, 2012
- [5] http://es.wikipedia.org/wiki/Long_Term_Evolution#Caracter.C3.ADsticas (LTE) *Última vez accedida: 1/9/2014*
- [6] <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/11983/fichero/Cap%EDtulo+2+-+LTE.pdf> *Última vez accedida: 1/9/2014*
- [7] <http://www.wikitel.info/wiki/SAE> *Última vez accedida: 1/9/2014*
- [8] http://es.wikipedia.org/wiki/Acceso_m%C3%BAltiple_por_divisi%C3%B3n_de_frecuencias_ortogonales *Última vez accedida: 1/9/2014*
- [9] http://departamento.pucp.edu.pe/ingenieria/images/documentos/seccion_telecomunicaciones/Capitulo%203%20Acceso%20Multiple%20OFDMA.pdf *Última vez accedida: 1/9/2014*
- [10] Subharthi Paul "Long Term Evolution (LTE) & Ultra-Mobile Broadband (UMB) Technologies for Broadband Wireless Access"
- [11] http://es.wikipedia.org/wiki/Historia_del_tel%C3%A9fono_m%C3%B3vil *Última vez accedida: 15/9/2014*
- [12] <http://es.wikipedia.org/wiki/Perturbador> *Última vez accedida: 15/9/2014*

[13] http://es.wikipedia.org/wiki/Interferencia_intencionada *Última vez accedida: 15/9/2014*

[14] http://es.wikipedia.org/wiki/Jaula_de_Faraday#Soluciones_con_este_m.C3.A9todo *Última vez accedida: 15/9/2014*

[15] <http://www.camara.gov.co/portal2011/noticias-destacadas/244-destacados/3139-habra-estandares-de-seguridad-para-instalacion-de-senales-radio-electricas> *Última vez accedida: 15/9/2014*

[16] Subharthi Paul , “Long Term Evolution (LTE) & Ultra-Mobile Broadband (UMB) Technologies for Broadband Wireless Access” *Última vez accedida: 15/9/2014*

[17] http://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/mobile-internet/white_paper_c11-613002.html *Última vez accedida: 15/9/2014*

[18] http://www.eventhelix.com/lte/lte-tutorials.htm#.VBwP0_1_s5I *Última vez accedida: 15/9/2014*

[19] <http://jwcn.eurasipjournals.com/content/2012/1/287/figure/F2> *Última vez accedida: 15/9/2014*

[20] http://www.wirelessdictionary.com/wireless_dictionary_UMTS_LTE_Physical_Downlink_Channels_Definition.html *Última vez accedida: 15/9/2014*